

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素

李振亮^{1,2}, 张代钧^{1,3*}, 卢培利¹, 曾善文¹, 杨永浩³

(1. 重庆大学环境科学系, 重庆 400044; 2. 重庆第二师范学院, 重庆 400067; 3. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 絮体粒径分布和分形维数是活性污泥的重要参数. 应用激光粒度仪测量了好氧活性污泥絮体在絮凝过程的粒径分布, 研究了速度梯度、VSS/SS、EPS 含量及 Zeta 电位对絮体粒径分布的影响. 结果表明, 絮体平均粒径与速度梯度显著负相关 ($R^2 > 0.80$), 与 Kolmogorov 尺度数量级基本相当, 其间差异性与污泥 VSS/SS、絮体强度等有关; 相同的速度梯度下, 絮体平均粒径与 VSS/SS 或 EPS 含量显著正相关 ($R^2 > 0.85$), 与 Zeta 电位负相关. 有机质和 EPS 在活性污泥絮凝中作用明显, 会增强絮体强度, 提升絮凝效果; EPS 中蛋白质比多糖对絮凝的促进作用更明显. 基于显微图像分析方法, 得到了好氧活性污泥絮体二维分形维数为 1.28 ~ 1.72, 三维分形维数为 1.70 ~ 2.69. 絮体分形维数随 VSS/SS 或 EPS 含量的增加而减小; 对于相同的活性污泥, 絮体三维分形维数随粒径增大而减小, 符合幂函数关系式.

关键词: 活性污泥; 絮体; 粒径分布; 分形维数; 速度梯度; EPS

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3975-06

Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge

LI Zhen-liang^{1,2}, ZHANG Dai-jun^{1,3}, LU Pei-li¹, ZENG Shan-wen¹, YANG Yong-hao³

(1. Department of Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing University of Education, Chongqing 400067, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing 400044, China)

Abstract: Floc size distribution (FSD) and fractal dimension are the important parameters for activated sludge. FSD of aerobic activated sludge during flocculation process was measured by a laser particle size analyzer, and the influence of velocity gradient, VSS/SS, EPS content and Zeta potential on FSD was investigated. The results showed that the floc volume-average size was negatively correlated to velocity gradient ($R^2 > 0.80$), and the order-of-magnitude of the floc volume-average size was equivalent to that of Kolmogorov scale (their differences were dependent on sludge VSS/SS, floc strength and etc). At a fixing velocity gradient, the floc volume-average size was positively correlated to VSS/SS or EPS ($R^2 > 0.85$), whereas negatively correlated to Zeta potential. Organic matter and EPS played important roles on the flocculation of activated sludge by enhancing the floc strength and improving the flocculation effect. Compared with polysaccharides, proteins in EPS seemed to be more beneficial for the flocculation of activated sludge. Based on microscopy and image analysis, the 2D and 3D fractal dimension of aerobic activated sludge floc was determined to be 1.28-1.72 and 1.70-2.69, respectively. It was found that fractal dimension (2D and 3D) was decreased with increasing VSS/SS (or EPS content). For the same activated sludge, the 3D fractal dimension was decreased with increasing floc size, and the relationship between 3D fractal dimension and floc size could be approximately described by a power function.

Key words: activated sludge; floc; floc size distribution (FSD); fractal dimension; velocity gradient; EPS

活性污泥法废水处理工艺中,二沉池内活性污泥通过絮凝和沉淀实现泥水分离,是决定出水水质的关键步骤之一.活性污泥絮凝过程受诸多因素影响,形成沉降性能各异的絮体.絮凝过程中的絮体粒径分布及其演化能够用来描述絮凝发生发展的情况.因此,通过絮体粒径分布研究活性污泥絮凝动力学过程成为近年的热点^[1~6].然而,已有工作多关注絮凝过程的速度梯度(或搅拌速度)对絮体粒径分布的影响,没有涉及活性污泥有机质和 EPS 含量以及 Zeta 电位等絮凝机制中的关键因素^[7~9]对絮体粒径分布的影响.在有关 EPS 对絮体絮凝性能影响的研究中,主要以絮凝评价指数或出水悬浮固

体浓度为指标^[10~12],极少直接考察絮体粒径分布.

分形结构是活性污泥絮体的重要特征之一,分形维数的准确描述对于絮凝动力学过程模拟至关重要^[13,14].絮体具有基本粒子-絮粒-絮体-絮体聚集体的多层结构,不同层次结构的絮体具有相异的分形维数^[15,16].现有絮凝动力学模型认为,絮体由基本粒子(类似于细胞,约 1 ~ 10 μm ; 结构密实,三维分形维数为 3)聚集而成;絮体越大,包含的基本粒子

收稿日期: 2013-01-08; 修订日期: 2013-03-12

基金项目: 重庆市自然科学基金重点项目 (CSTC2013JJB20002)

作者简介: 李振亮 (1981 ~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为水环境模型与模拟, E-mail: zhenliangli@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dzhang@cqu.edu.cn

数越多,结构愈松散,分形维数越小^[17]. 目前,活性污泥絮体分形维数的研究集中于基于分形理论通过实验数据拟合获得分形维数值^[18~21],缺乏对絮体分形维数与粒径间关系的探究.

为进一步认识活性污泥絮体的絮凝过程,促进絮凝动力学模型与絮凝机制的有机结合,本研究以SBR培养好氧活性污泥絮体,考察了速度梯度、污泥有机质含量(VSS/SS)、EPS含量和Zeta电位对絮体粒径分布的影响;从絮体粒径分布的角度,比较了不同絮体的强度和絮凝效果;通过显微图像分析,揭示了活性污泥絮体分形维数的影响因素,探究了分形维数与粒径的关系.

1 材料与方法

1.1 活性污泥培养

取城市污水处理厂回流污泥(MLVSS/MLSS为38.86%),室温下在SBR内培养. 合成废水主要由乙酸钠、氯化铵、磷酸二氢钾、及少量的硫酸镁、氯化钙、硫酸亚铁等配置而成,COD:TN:TP=100:5

:1. 反应器运行初期进水COD为250 mg·L⁻¹左右,运行后期进水COD为450 mg·L⁻¹左右. 整个运行期间,通过排泥维持MLSS在3 g·L⁻¹左右;pH维持在7.0左右. 反应器每4 h为一个运行周期:进水、曝气、搅拌216 min(包含进水12 min)-沉降12 min-出水12 min.

1.2 活性污泥絮体粒径分布测量

采用深圳中润ZR4-6六联搅拌机模拟絮凝反应器. 参考城市污水处理厂反应器中速度梯度典型值(20~150 s⁻¹)^[2],通过改变搅拌速度(80~280 r·min⁻¹)获得所需的平均速度梯度(G)28.2~149.8 s⁻¹(表1). 表1中,搅拌速度为550 r·min⁻¹($G=360.3$ s⁻¹,该值与下文所述的激光粒度分析仪以最大流量进样时的速度梯度一致)时的絮体粒径分布,视作絮体机械破碎后絮凝的初始状态. 有研究者采用超声波破碎絮体,但超声处理可能导致絮体的EPS溶出、甚至微生物细胞溶解,影响絮凝效果;因此,Govoreanu^[22]建议研究絮体絮凝应采用机械搅拌的破碎方式.

表1 搅拌机和激光粒度分析仪的操作参数

Table 1 Operation parameters for ZR4-6 and S3500

ZR4-6 六联搅拌机	搅拌速度/r·min ⁻¹	80	150	210	280	550
	G/s^{-1}	28.2	64.7	101.7	149.8	360.3
激光粒度分析仪 S3500	进样流量/mL·s ⁻¹	6.5	13	19.5	29.25	65
	G/s^{-1}	33.1	66.2	99.3	149.0	331.0

絮体粒径分布采用激光粒度分析仪S3500(Microtrac,Enhanced 型号,测量范围为0.02~2 800 μm,最大流量65 mL·s⁻¹,可按5%递减设置)测量. 絮体从进样口流经长约40 cm、内径约1 cm的进样管至光路测量系统. 为了减小测量过程进样的流动剪切作用对絮体粒径的影响,需要选择合适的进样流量使进样管内的速度梯度与絮凝搅拌的速度梯度保持一致(表1). 当流量在29.25 mL·s⁻¹及以下时,雷诺数 Re 为828~3 724,进样流可视为圆管层流,速度梯度的计算见式(1).

$$G \approx 2 u/R \tag{1}$$

式中, u 为进样速度(m·s⁻¹), R 为进样管半径(m).

1.3 活性污泥EPS和Zeta电位测量

按照文献[23]的热提取法提取活性污泥絮体中的EPS,采用Fulin-酚法测定其中的蛋白质(PN),蒽酮-硫酸法测定其中的多糖(PS).

取反应周期末的污泥混合液(偏弱碱性,用HCl调节pH至7.0±0.02)静置10 min,取上清液采用Zetasizer Nano ZS90(Malvern)测定Zeta电位(3次测

定,取平均值).

1.4 活性污泥絮体分形维数计算

絮体稀释分散至装有去离子水的培养皿中,电脑型透反偏光显微镜(XPV-600E)拍摄图像. 用Matlab 7.0编写程序对图像进行二值化处理,并计算面积 A 、周长 P 及当量直径 L 的像素数. 絮体实际粒径为 L 的像素数乘以像元尺寸2.64 μm. 基于分形理论,絮体二维分形维数 D_2 可由lg(A)与lg(P)拟合得到,详见文献[19].

2 结果与讨论

2.1 粒径分布

2.1.1 速度梯度的影响

不同速度梯度下的絮体体积平均粒径(絮体平均粒径, $L[4,3]$)随时间的变化见图1($VSS/SS=54.35\%$). 在絮凝过程的初期, $L[4,3]$ 快速增长,15 min后基本趋于稳定. 絮凝30 min后的絮体粒径分布见图2. 不同VSS/SS的活性污泥絮体平均粒径与速度梯度显著负相关($R^2>0.80$),见图3.

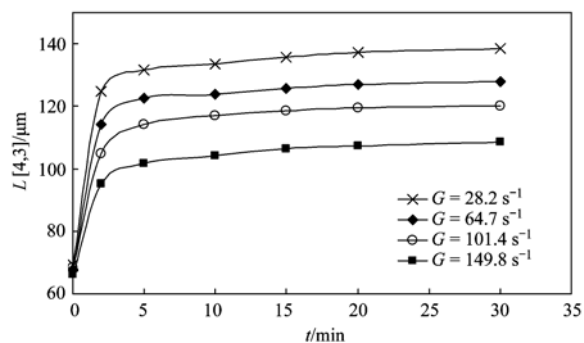


图1 不同速度梯度的絮体平均粒径变化

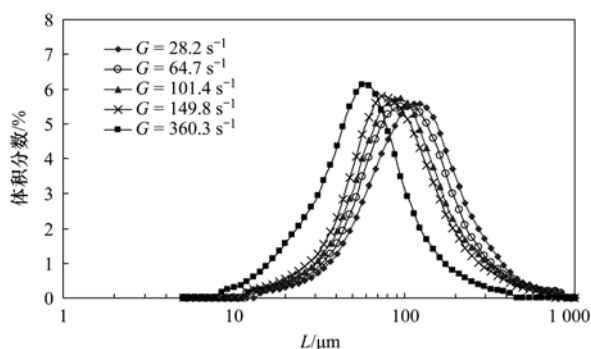
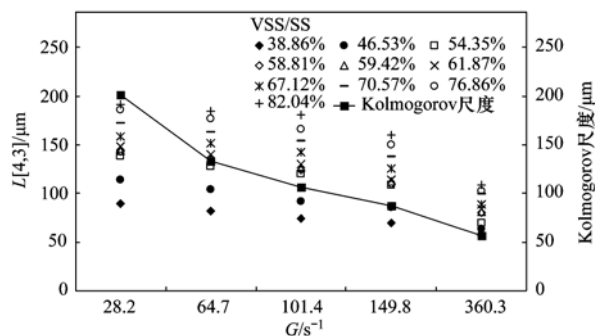
Fig. 1 Evolution of $L[4,3]$ at different velocity gradient

图2 不同速度梯度的絮体粒径分布

Fig. 2 FSD at different velocity gradient



絮体取自不同的 VSS/SS 活性污泥

图3 不同速度梯度的絮体平均粒径与 Kolmogorov 尺度的比较

Fig. 3 Comparison of $L[4,3]$ with Kolmogorov scale at different velocity gradient

在本研究所采用的速度梯度下(对应的 Re 分别为3 311、6 208、8 691、11 588),活性污泥混合液的运动状态均可视作湍流.经典 Kolmogorov 理论认为,湍流会产生许多不同尺度的涡;这些涡的最小尺度为 Kolmogorov 尺度 η_K ,可由式(2)计算.

$$\eta_K = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4} \quad (2)$$

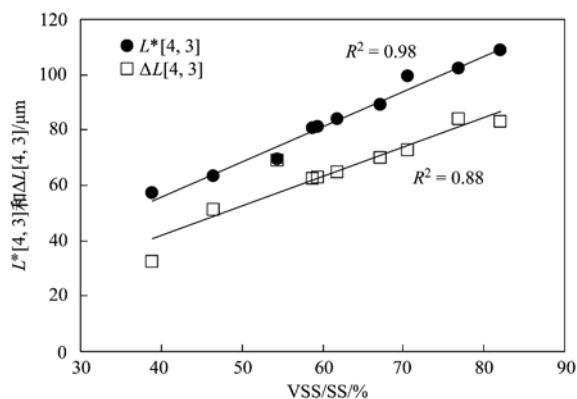
式中,能耗率 ε 可通过速度梯度 G 和运动黏性系数 ν 计算[式(3)].

$$G = (\varepsilon/\nu)^{1/2} \quad (3)$$

絮体平均粒径与 Kolmogorov 尺度关系密切,有研究者认为二者在数值上基本相当^[17].本研究考察了不同 VSS/SS 的活性污泥絮体平均粒径与 Kolmogorov 尺度的关系(图3),表明不同的速度梯度下,两者只是数量级基本相当,但具体数值可能差异较大,与活性污泥类别有关;对于同种活性污泥絮体,速度梯度由较小值($G = 28.2 \text{ s}^{-1}$)升至较大值($G = 360.3 \text{ s}^{-1}$)时, $L[4,3]$ 由均小于 Kolmogorov 尺度,逐渐变为均大于 Kolmogorov 尺度.絮凝过程中,絮体平均粒径取决于絮体聚并与破碎的平衡. Kolmogorov 尺度影响絮体的破碎行为,絮体粒径超过 Kolmogorov 尺度时容易破碎^[4,6,24].图3中, $L[4,3]$ 大于 Kolmogorov 尺度的情况(尤其是 $G = 360.3 \text{ s}^{-1}$ 时无法将絮体破碎至 Kolmogorov 尺度以下)表明,絮体的破碎行为可能还与其他因素(如污泥 VSS/SS、絮体强度等)有关.

2.1.2 VSS/SS、EPS 与 Zeta 电位的影响

在相同的速度梯度下,絮体平均粒径 $L[4,3]$ 与活性污泥的 VSS/SS 或 EPS 含量显著正相关($R^2 > 0.85$),与 Zeta 电位负相关($R^2 \approx 0.29 \sim 0.39$).以絮体在最大速度梯度($G = 360.3 \text{ s}^{-1}$)下的平均粒径($L^*[4,3]$)作为指标衡量在较大剪切作用下的絮体强度,以絮体在最小速度梯度($G = 28.2 \text{ s}^{-1}$)与最大速度梯度($G = 360.3 \text{ s}^{-1}$)下的平均粒径差值($\Delta L[4,3]$)作为指标衡量絮体在剪切作用下的絮凝能力.图4和图5显示, $L^*[4,3]$ 和 $\Delta L[4,3]$ 均与活性污泥中有机质和 EPS 含量显著正相关,说明有机质和 EPS 在生物絮凝中作用明显,其含量增加,会加强絮体强度,增强絮凝效果.尽管有研究以再絮凝能力指数(FA)或出水悬浮固体浓度(ESS)作为指标间接描述活性污泥的絮凝性能,认为 EPS 含量的增大不利于生物絮凝^[11, 12],但这些研究利用超声

图4 VSS/SS 变化对 $L^*[4,3]$ 和 $\Delta L[4,3]$ 的影响Fig. 4 Effect of VSS/SS on $L^*[4,3]$ and $\Delta L[4,3]$

波破碎活性污泥絮体的方法可能对结果有影响,而且只考察了 EPS 含量,并未考虑生物量的变化. Wilén 等^[11]发现 EPS 组成对活性污泥絮体的絮凝能力有影响,当 EPS 中蛋白质含量增加时,絮体絮凝能力增强. 本研究中, EPS 含量与生物量 (VSS/SS) 的增长是同步的,并且 EPS 中蛋白质增长较多 (从 21.92 ~ 78.95 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$),多糖增长较少 (从 5.11 ~ 16.81 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

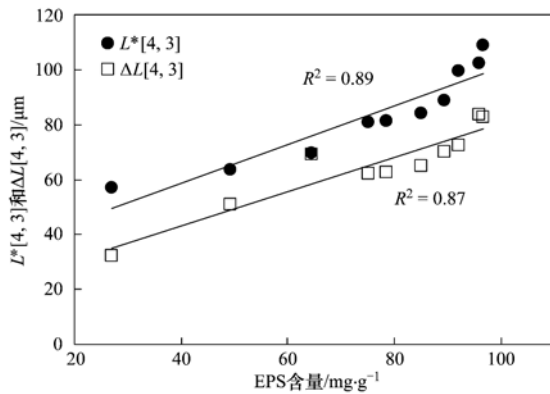


图 5 EPS 变化对 $L^*[4,3]$ 和 $\Delta L[4,3]$ 的影响

Fig. 5 Effect of EPS content on $L^*[4,3]$ and $\Delta L[4,3]$

$L^*[4,3]$ 和 $\Delta L[4,3]$ 随 Zeta 电位的减小而增加,但线性关系并不显著 (图 6). Zeta 电位与蛋白质和多糖的比例 (PN/PS) 有关,随 PN/PS 的增加而减小 (图 7),这与文献^[25]的结论一致;这也可能是蛋白质含量增加有利于生物絮凝的原因之一.

2.2 分形维数

VSS/SS 为 46.53%、67.17% 和 76.86% 的活性污泥絮体有效样本数分别为 147、231 和 94. 絮体的显微图像和面积 A 、周长 P 二值化像素图示例见

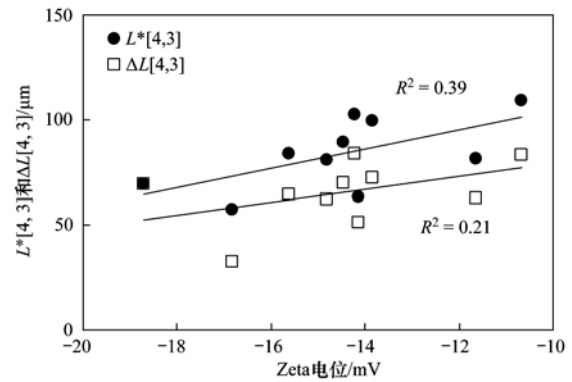


图 6 Zeta 电位变化对 $L^*[4,3]$ 和 $\Delta L[4,3]$ 的影响

Fig. 6 Effect of Zeta potential on $L^*[4,3]$ and $\Delta L[4,3]$

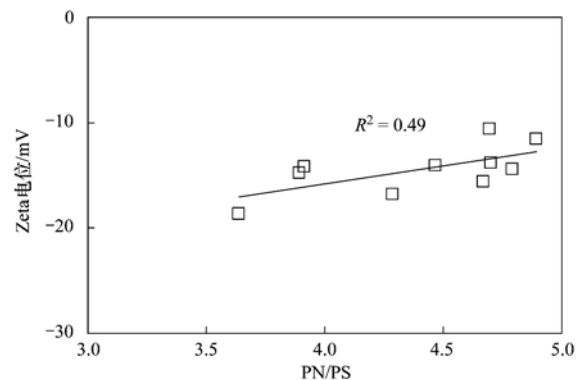


图 7 Zeta 电位与蛋白质/多糖的关系

Fig. 7 Relation between Zeta potential and PN/PS

图 8.

以 VSS/SS 为 76.86% 的活性污泥为例, $\lg(A)$ 与 $\lg(P)$ 拟合得到絮体分形维数 D_2 为 1.44 [图 9 (a)]. 根据分形的自相似性,该分形维数值适合于所有粒径的絮体. 为了考察不同层次结构的絮体的

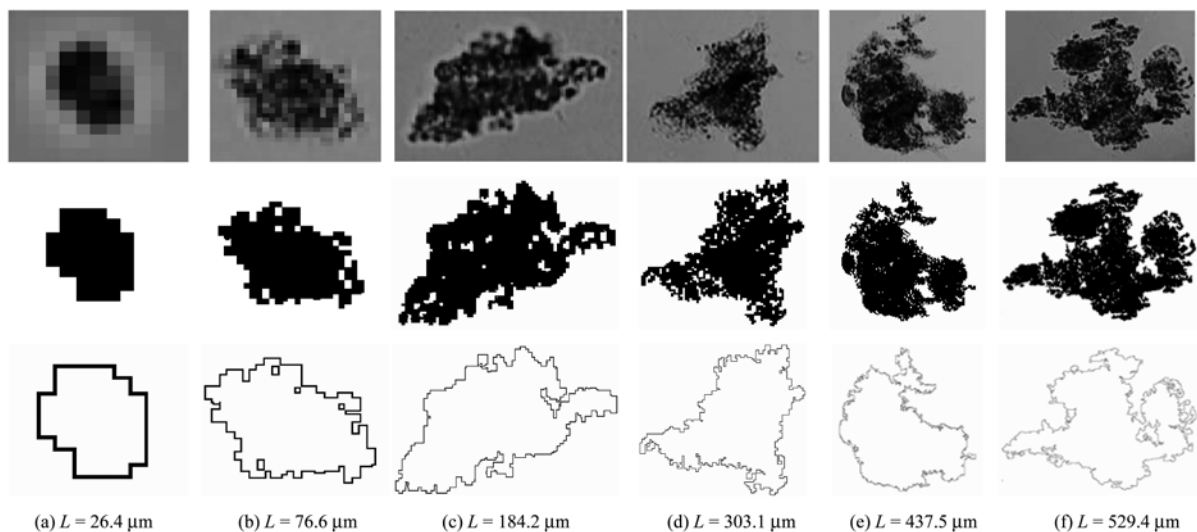


图 8 活性污泥絮体的显微图像和絮体面积、周长像素图示例

Fig. 8 Microscope images and pixel images for area A and perimeter P of flocs in activated sludge

分形维数,将絮体划分为小絮体(粒径小于 150 μm)和大絮体(粒径大于 150 μm),拟合得到各自的 D_2 分别为 1.72 和 1.28[图 9(b)];说明分形维数的拟合计算中,粒径范围的选取对结果影响较大。

活性污泥絮体 D_2 随 VSS/SS 或 EPS 含量的增加而减小(表 2),其中小絮体的 D_2 略有增加(可能是由于在培养中絮体不断地破碎-再絮凝,致使小絮体愈来愈密实),大絮体的 D_2 显著减小。

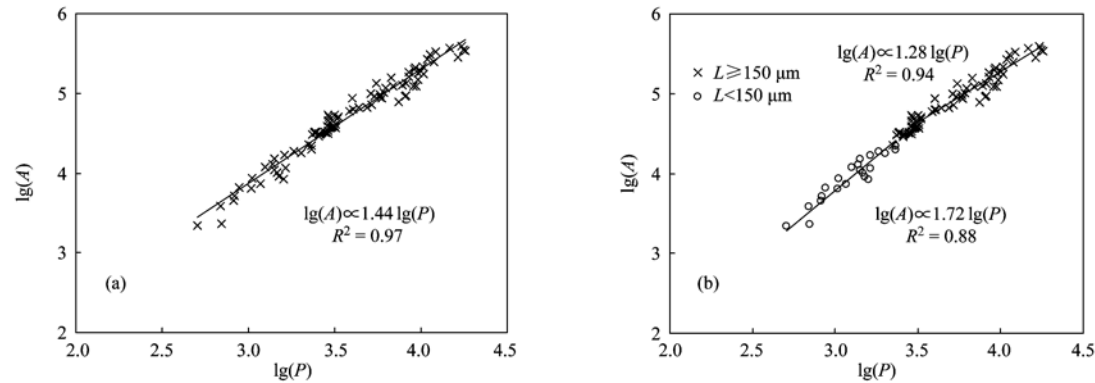


图 9 lg(A)-lg(P) 拟合计算分形维数(D_2)
Fig. 9 Fractal dimension (D_2) calculated by lg(A)-lg(P)

表 2 不同 VSS/SS(或 EPS 含量)的活性污泥絮体分形维数(D_2)
Table 2 Fractal dimension (D_2) of flocs in activated sludge with different VSS/SS or EPS content

VSS/SS/%	EPS 含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	分形维数 D_2		
		总体	小絮体(粒径 <150 μm)	大絮体(粒径 ≥150 μm)
46.53	49.37	1.66 ($R^2 = 0.96$)	1.67 ($R^2 = 0.95$)	1.63 ($R^2 = 0.63$)
67.17	85.14	1.62 ($R^2 = 0.97$)	1.69 ($R^2 = 0.94$)	1.45 ($R^2 = 0.88$)
76.86	96.05	1.44 ($R^2 = 0.97$)	1.72 ($R^2 = 0.88$)	1.28 ($R^2 = 0.94$)

表 2 中,同种活性污泥絮体,大絮体的 D_2 明显小于小絮体的 D_2 . 絮体的分形维数和粒径是否存在一种定量关系? Maggi^[17]做了这方面的探索,认为絮体粒径愈大,絮体分形维数愈小;三维分形维数 D_3 与粒径 L 符合幂函数关系[式(4)].

$$D_3 = \delta L^\gamma \tag{4}$$

式中, δ 、 γ 为参数; D_3 与分形维数 D_p 有式(5)转化关系。

$$D_3 = [a/(D_p + b)]^{1/2} \tag{5}$$

式中, a 、 b 为参数,表达式见文献[17,26]; D_p 可由式(6)计算,其值介于 1~2 之间(相同面积时, D_p 愈大,说明外形轮廓可能愈复杂)。

$$D_p = 2 \lg(P)/\lg(A) \tag{6}$$

对本研究所采集的活性污泥絮体样本,按 Maggi 的方法可计算得到相似的结果(图 10), D_3 为 1.70~2.69, D_3 随粒径增大而减小,符合幂函数关系式. 另外,由图 10 可见,与前述 D_2 的变化类似, D_3 也随 VSS/SS(或 EPS 含量)的增加而明显减小。

3 结论

(1)活性污泥絮体平均粒径与速度梯度显著负

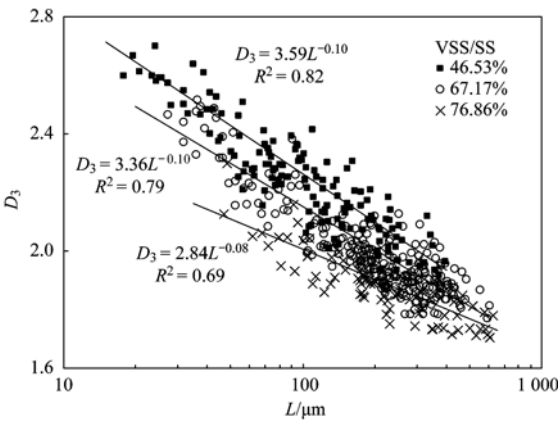


图 10 絮体分形维数(D_3)与粒径的关系
Fig. 10 Relationship between Fractal dimension (D_3) and floc size

相关,与 Kolmogorov 尺度数量级基本相当,其间差异性与污泥 VSS/SS、絮体强度等有关。

(2)相同的速度梯度下,活性污泥絮体平均粒径与 VSS/SS 或 EPS 含量显著正相关,与 Zeta 电位负相关. 活性污泥中的有机质和 EPS 在活性污泥絮凝中作用明显,会增强絮体强度,提升絮凝效果. EPS 中蛋白质比多糖对絮凝的促进作用更为明显。

(3)活性污泥絮体(二维和三维)分形维数随

VSS/SS 或 EPS 含量的增加而减小. 对于相同的活性污泥,絮体三维分形维数随粒径增大而减小,符合幂函数关系式: $D_3 = \delta L^\gamma (\gamma < 0)$.

参考文献:

- [1] Thomas D N, Judd S J, Fawcett N. Flocculation modelling: a review[J]. *Water Research*, 1999, **33**(7): 1579-1592.
- [2] Biggs C A, Lant P A. Activated sludge flocculation: on-line determination of floc size and the effect of shear[J]. *Water Research*, 2000, **34**(9): 2542-2550.
- [3] Bouyer D, Liné A, Do-Quang Z. Experimental analysis of floc size distribution under different hydrodynamics in a mixing tank[J]. *AIChE Journal*, 2004, **50**(9): 2064-2081.
- [4] Nopens I. Modelling the Activated Sludge Flocculation Process: A Population Balance Approach[D]. Gent: Universiteit Gent, 2005. 137-149.
- [5] Ding A, Hounslow M J, Biggs C A. Population balance modelling of activated sludge flocculation: Investigating the size dependence of aggregation, breakage and collision efficiency[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, **61**(1): 63-74.
- [6] Coufort C, Bouyer D, Liné A, *et al.* Modelling of flocculation using a population balance equation[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2007, **46**(12): 1264-1273.
- [7] 周琪, 林涛, 谢丽, 等. 污水处理生物絮体絮凝沉淀机理分析的综述[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, **37**(1): 78-93.
- [8] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 882-94.
- [9] Li H S, Wen Y, Cao A S, *et al.* The influence of additives (Ca^{2+} , Al^{3+} , and Fe^{3+}) on the interaction energy and loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) of activated sludge and their flocculation mechanisms[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 188-194.
- [10] Liao B Q, Allen D G, Droppo I G, *et al.* Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability[J]. *Water Research*, 2001, **35**(2): 339-50.
- [11] Wilén B M, Jin B, Lant P A. Impacts of structural characteristics on activated sludge floc stability[J]. *Water Research*, 2003, **37**(15): 3632-3645.
- [12] 张兰河, 李军, 郭静波, 等. EPS 对活性污泥絮凝沉降性能与表面性质的影响[J]. *化工学报*, 2012, **63**(6): 1865-1871.
- [13] Maggi F, Mietta F, Winterwerp J C. Effect of variable fractal dimension on the floc size distribution of suspended cohesive sediment[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **343**(1-2): 43-55.
- [14] Maerz J, Verney R, Wirtz K, *et al.* Modeling flocculation processes: Intercomparison of a size class-based model and a distribution-based model[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, **31**(10): S84-S93.
- [15] Francois R, van Haute A. Structure of hydroxide flocs[J]. *Water Research*, 1985, **19**(10): 1249-1254.
- [16] Jorand F, Zartarian F, Thomas F, *et al.* Chemical and structural (2D) linkage between bacteria within activated sludge flocs[J]. *Water Research*, 1995, **29**(7): 1639-1647.
- [17] Maggi F. Flocculation Dynamics of Cohesive Sediment[D]. Delft: Delft University of Technology, 2005. 72-73, 120-125.
- [18] Li D H, Ganczarczyk J. Fractal geometry of particle aggregates generated in water and waste-water treatment processes[J]. *Environmental Science and Technology*, 1989, **23**(11): 1385-1389.
- [19] 金鹏康, 王晓昌. 腐殖酸絮凝体的形态学特征和混凝化学条件[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(增刊): 23-29.
- [20] 李冬梅, 施周, 梅胜, 等. 絮凝条件对絮体分形结构的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 488-492.
- [21] 钟润生, 张锡辉, 肖峰, 等. 絮体分形结构对沉淀速度影响研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(8): 2353-2357.
- [22] Govoreanu R. Modelling the Activated Sludge Flocculation Process: On-Line Measurement Methodology and Modelling[D]. Gent: Universiteit Gent, 2004. 64-65.
- [23] 刘翔, 黄映恩, 刘燕, 等. 活性污泥和生物膜的胞外聚合物提取方法比较[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2011, **50**(5): 556-562.
- [24] Yuan Y, Farnood R R. Strength and breakage of activated sludge flocs[J]. *Powder Technology*, 2010, **199**(2): 111-119.
- [25] 王浩宇, 苏本生, 黄丹, 等. 好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1614-1620.
- [26] Maggi F, Winterwerp J C. Method for computing the three-dimensional capacity dimension from two-dimensional projections of fractal aggregates[J]. *Physical Review E*, 2004, **69**(1): 011405.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行